doi:10.13866/j.azr.2019.04.22

渭河流域蒸发皿蒸发量时空变化与驱动因素①

张鹏飞[1]， 赵广举[1,2]， 穆兴民[1,2]， 高 鹏[1,2]， 孙文义[1,2]
（1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室，陕西 杨凌 712100；
2. 中国科学院水利部水土保持研究所，陕西 杨凌 712100）

摘 要：以渭河流域为研究区，获取流域内21个气象站1978—2002年20 cm口径蒸发皿和1985—2015年E-601型蒸发器日观测资料，采用线性回归模型重构各站点蒸发皿蒸发数据资料，Mann-Kendall趋势检验与空间插值法分析流域蒸发皿蒸发量的时空变换特征，敏感性分析法定量评估各气象要素对蒸发皿蒸发量变化的贡献。结果表明：流域多年平均蒸发皿蒸发能力低于黄河流域的平均水平，蒸发皿蒸发量介于1 015.5～1 705.6 mm，其空间分布状况表现为由北向南逐渐减少；年蒸发皿蒸发量总体呈增加趋势，变化率为1.371 mm·a^{-1}；蒸发皿蒸发量对实际水汽压最敏感；气温是影响蒸发皿蒸发量的主导因子，其贡献率为304.5%。

关键词：蒸发皿蒸发量；时空变化；敏感性分析；驱动因素；渭河流域

蒸发是水文循环的一个重要过程，与地表水量平衡及能量平衡密切相关[1-2]。全球范围内的蒸发与大气环流和降雨时空分布等相互影响，进而对人类的生产、生活产生影响[3]。因此，研究蒸发变化对于深入了解气候变化规律、保障水资源的合理分配与高效利用以及促进农业生产发展等方面具有重要意义。

IPCC（2014）报告指出：未来全球平均气温将以0.15 ℃·(10a)$^{-1}$的速率增加；中纬度地区和亚热带干燥地区平均降水可能会减少，中纬度湿润地区平均降水可能会增加。诸多学者预测，气候变暖可能会引起大气变干，进而导致陆面蒸发量增加；也有研究表明，随着气温的升高，蒸发量却呈下降趋势，这一现象被称之为"蒸发悖论"。目前国内外学者对蒸发皿蒸发量变化研究众多，Roderick等[4]采用质量和能量平衡物理模型，分析1975—2004年澳大利亚气候要素对蒸发皿蒸发的贡献，发现蒸发皿蒸发量的减少主要由风速变化引起；Zhang等[5]利用全国588个气象站观测资料，研究发现东北到西南成带状分布，蒸发皿蒸发量呈显著和非显著增加趋势，主要是受相对湿度的影响；刘敏等[6]研究了中国近50 a蒸发皿蒸发量变化得出，蒸发量的减少由气温日较差和平均风速的减少引起；Ning等[7]分析了1960—2013年黄土高原北部潜在蒸发的时空变化特征，认为该区"蒸发悖论"不明显，气温是影响蒸发的主要因素；Wang等[8]采用12种大气环流模型分析全国范围内"蒸发悖论"，得出"蒸发悖论"未来不会出现；左洪超等[9]根据边界层理论重新界定了蒸发皿蒸发量的物理含义及其与环境因子的关系，认为气候变化对蒸发皿蒸发的影响非常复杂，仍需进一步观测和研究。虽然国内外学者针对蒸发皿蒸发已有大量研究成果，但对蒸发皿蒸发量变化的驱动机制仍不清楚，亟需进一步研究。

本文利用渭河流域21个气象站的观测资料，分析流域蒸发皿蒸发量的时空变化及驱动因素，为深入理解区域水循环提供科学依据，为农业发展和水资源的合理利用提供参考。

1 研究区概况

渭河是黄河第一大支流，始于甘肃省渭源县鸟鼠山，于陕西省潼关县汇入黄河，流经甘肃、宁夏、陕西3省，流域总面积1.35×10^5 km^2，其中甘肃、宁夏、陕西各占44.1%、5.8%和50.1%。渭河干流全长818 km，两岸支流众多，泾河是最大的支流，全长455 km，北洛河为第二大支流，河长680 km（图1）。

① **收稿日期：**2018-10-08； **修订日期：**2018-12-12
基金项目：国家重点研发计划（2016YFC0402401）；国家自然科学基金（41671279，41671285）
作者简介：张鹏飞（1994-），男，硕士研究生，主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持. E-mail：caomao777@163.com
通讯作者：赵广举. E-mail：gjzhao@ms.iswc.ac.cn

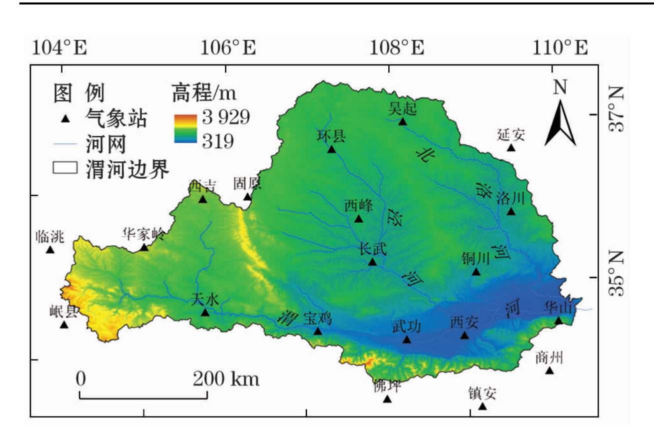


图 1　渭河流域气象站点分布

Fig. 1　Distribution of the meteorological stations in the Weihe River Basin

流域地处半湿润和半干旱过渡区,属大陆性季风气候。多年平均降雨量 610.4 mm,多年平均气温 7.8～13.5 ℃[10-11]。流域西部为黄土丘陵沟壑区,东为关中平原区,流域北以六盘山为界,南有东西走向的秦岭山脉为障,地形特点西高东低,独特的地理特性使得该流域聚集了陕西约 60% 的人口、56% 的耕地和 72% 的灌溉农业,创造了陕西省 68.5% 和西北地区 26.9% 的生产总值[12]。

2　资料与方法

2.1　资料

选取渭河流域 21 个气象站 1978—2002 年 20 cm 口径蒸发皿和 1985—2015 年 E-601 型蒸发器逐日观测数据,各站最高气温、最低气温、相对湿度、日照时数、平均风速等基础资料(对于个别站点出现单日缺测,以该站缺测日前后几日观测值求平均替代)。将 1985—2002 年两种蒸发器对比观测的蒸发数据,求出两者的折算系数[13],即 E-601 型蒸发器与 20 cm 口径蒸发皿观测数据的比值,重构 20 cm 口径蒸发皿 1978—2015 年共计 38 a 完整蒸发序列数据(以下称蒸发皿蒸发量),计算月、季、年蒸发量,通过算术平均法计算各站年季多年平均蒸发皿蒸发量。年季数据统计,按自然年统计年数据,即每年 1—12 月加和;按水文年统计季节数据,即 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季。气象资料来源于中国气象局国家气象信息中心(http://data.cma.cn/)。

2.2　方法

2.2.1　空间插值　为了准确反映蒸发皿蒸发的空间分布,在 ArcGIS 10.2 环境下运用 Spline 进行空间插值。Spline 插值法既保留了局部插值的细节特征,又可得到连续光滑的拟合曲面,相较于 Kriging 插值法和 IDW 插值法,该方法的优点具有较好的保凸性和逼真性,并且具有良好的平滑性[14-15]。

2.2.2　Mann-Kendall 趋势检验　Mann-Kendall(以下简称 MK)趋势检验法是一种用于分析时间序列趋势的非参数检验方法[16-17]。该方法被广泛应用于气温、降水、径流和输沙量等时间序列的变化趋势分析[18]。MK 趋势检验方法不要求分析样本遵从一定分布,同时也不受其他异常值的干扰,适用于水文、气象等非正态分布数据,计算简便[19]。

2.2.3　敏感性　由 Penman-Monteith 公式可知,蒸发主要受气温(T),太阳净辐射(R_n),实际水汽压(e_a)和风速(U_2)4 个因子影响,故本文对这 4 个因子进行分析。通过计算各变量因子的偏导数,获取蒸发皿蒸发对各个因子的敏感系数[20-21]。敏感系数 S_x 表示变量因子变化比率导致结果变化的百分率,计算公式[22]如下:

$$S_x = \lim_{\Delta x \to 0} \left(\frac{\Delta PE / PE}{\Delta x / x} \right) = \frac{\partial PE}{\partial x} \times \frac{x}{PE} \tag{1}$$

式中:S_x 为敏感系数,x 为变量因子;PE 为蒸发皿蒸发量(mm)。敏感系数绝对值越大,表示其对蒸发量的影响越大,S_x 为正时表示变量与蒸发量呈正相关关系;S_x 为负则表示随着变量增加(减少)蒸发皿蒸发量减少(增加)。本文通过计算渭河流域多年月平均气温、月平均实际水汽压、月平均净辐射量、月平均风速得出敏感系数。

2.2.4　贡献率分析　通过某一变量的偏导数与长期变化趋势的乘积来估算该变量因子的贡献率,因此每个气候因子随时间变化对 PE 的贡献通过下式[23]计算:

$$\frac{dPE}{dt} = \frac{\partial PE}{\partial T_{mean}} \times \frac{dT_{mean}}{dt} + \frac{\partial PE}{\partial R_n} \times \frac{dR_n}{dt} + \frac{\partial PE}{\partial e_a} \times \frac{de_a}{dt} + \frac{\partial PE}{\partial U_2} \times \frac{dU_2}{dt} \tag{2}$$

式中:t 表示单位时间(每天、每月或每年)。式(2)可简写成:

$$L(PE) = \frac{dPE}{dt} = C(T_{mean}) + C(R_n) + C(e_a) + C(U_2) \tag{3}$$

式中:$L(PE)$ 表示 PE 的长期趋势;$C(T_{mean})$,$C(R_n)$,$C(e_a)$ 和 $C(U_2)$ 分别表示 T_{mean},R_n,e_a 和 U_2 各自变化对 PE 的长期趋势的贡献。此外,单个气候

因子对 PE 长期趋势的贡献率为:

$$p(x)=\frac{C(x)}{C(T_{mean})+C(R_n)+C(e_a)+C(U_2)}\times100\%=\frac{C(x)}{C(PE)}\times100\% \tag{4}$$

式中:$p(x)$单个气候因子对 PE 长期趋势的贡献率;$C(PE)$表示蒸发皿蒸发趋势的总贡献。

3 结果与分析

3.1 蒸发皿蒸发量空间分布特征

由图 2 可知,流域多年平均蒸发皿蒸发量介于 1 015.5 ~ 1 705.6 mm,均值为 1 458 mm,南北差异明显,整体呈现出由北至南逐渐减小的趋势。随着地势变化,流域从上游至下游年蒸发皿蒸发量呈减少趋势,北部为黄土高原,蒸发能力最高,超过 1 500 mm;南部为秦岭北麓,蒸发量低于 1 300 mm。

由图 3 可知,春季、夏季、秋季蒸发皿蒸发量与年蒸发皿蒸发量的空间分布一致,呈现北高南低的特征。3 个季节蒸发皿蒸发量差异显著,春季蒸发皿蒸发量变化范围在 312.1 ~ 594.7 mm,夏季在 381.9 ~ 719.2 mm,秋季在 196.5 ~ 367.4 mm,最大值出现在流域西北部,最小值出现在流域东南部。冬季蒸发皿蒸发量的空间分布与其他季节不同,变化范围在 91.8 ~ 200.2 mm,最大值出现在渭河中上部,最小值出现在流域北部,由北至南呈先增加后减少的变化趋势。不同季节蒸发皿蒸发量依次为:夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季,分别占年值的 38.4% 、31.7% 、19.7% 和 10.2% ,四季中春夏两季对年值的贡献最大。有研究表明黄河流域 1980—2010 年多年平均蒸发皿蒸发量约为 1 679.4 mm[24-25],而渭河流域多年蒸发皿蒸发量均值为 1 458 mm,低于平均水平,但渭河流域北部黄土高原区蒸发皿蒸发量接近黄河流域的平均水平,且有个别站略高于平均水平,因此,黄河流域较高的蒸发能力非渭河流域

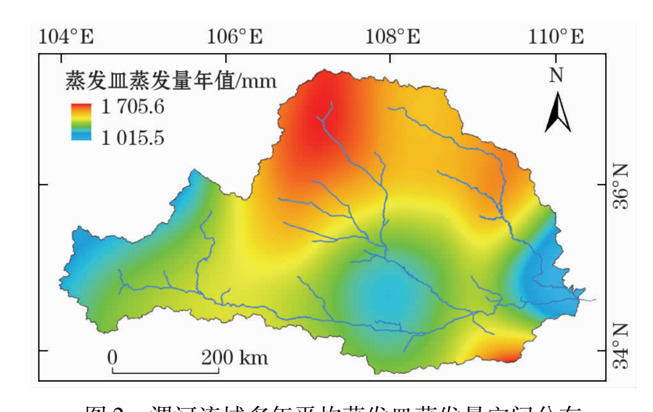


图 2 渭河流域多年平均蒸发皿蒸发量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of average annual pan evaporation in the Weihe River Basin

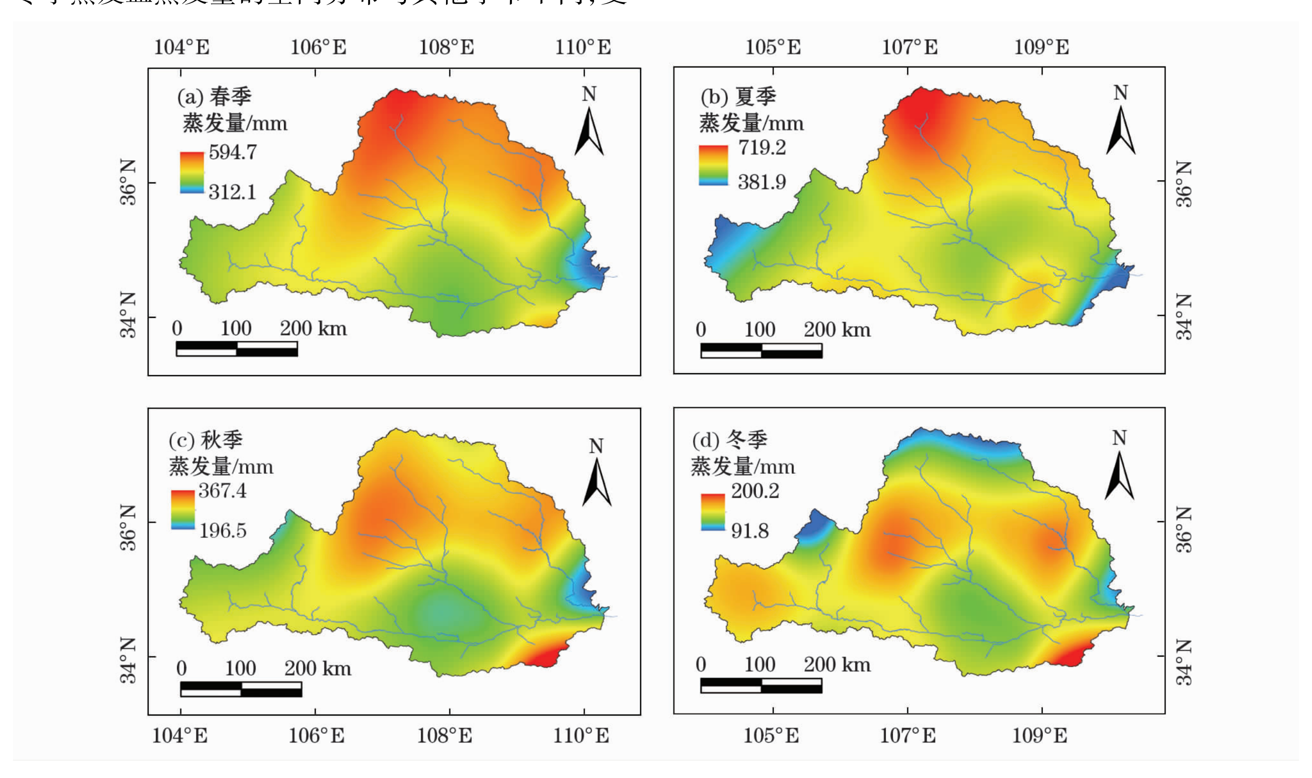
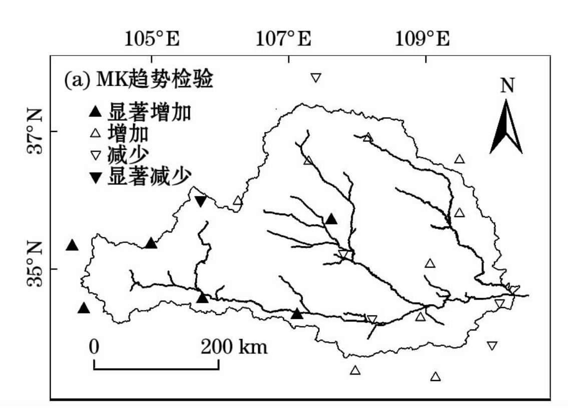


图 3 渭河流域多年平均季节蒸发皿蒸发量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of long-term average seasonal pan evaporation in the Weihe River Basin



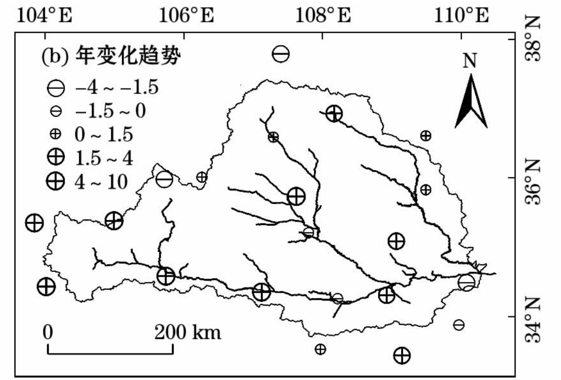


图 4　渭河流域蒸发皿蒸发量年变化趋势的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of annual pan evaporation trend in the Weihe River Basin

所贡献。

3.2　蒸发皿蒸发量年际变化特征

计算分析流域 21 个气象站蒸发皿蒸发量数据得出：流域内 15 个气象站的 Z 值(通过 MK 计算的检验统计量)和斜率 b(年蒸发皿蒸发量变化趋势)均为正值，年蒸发皿蒸发量变化率在 0.694～9.799 mm · a^{-1}，其中有 6 个站的 Z 值通过了 0.05 显著性检验，年蒸发皿蒸发量呈显著增长趋势，在临洮、岷县、天水 3 站年蒸发皿蒸发量呈 0.001 极显著增长趋势；其他 6 个站的 Z 值和 b 值则为负，年蒸发皿蒸发量变化率在 −0.609～−3.415 mm · a^{-1}，其中只有西吉站通过了 0.1 显著性水平检验。通过检测多站年蒸发皿蒸发量均值得出：流域年蒸发皿蒸发量呈非显著增加趋势，变化率为 1.371 mm · a^{-1}；上半年(多站春夏两季蒸发皿平均蒸发量之和)呈增加趋势，斜率为 1.577 mm · a^{-1}；下半年(多站秋冬两季蒸发皿平均蒸发量之和)呈减少趋势，斜率为 −0.28 mm · a^{-1}。由图 4a 可知流域西部及中部呈现显著增加趋势，东部增加趋势较西部弱，个别站点呈减少趋势，仅西吉站表现出显著减少的趋势；图 4b 武功、西吉、盐池、长武、华山及商州年蒸发皿蒸发量呈减少趋势，且站点分布较分散，蒸发皿蒸发量下降趋势不明显；其他各站均呈增加趋势，其中宝鸡、临洮、华家岭、西峰、天水和岷县的年蒸发皿蒸发量斜率通过了显著性水平为 0.05 的假设检验，且站点多分布在流域西部，增加趋势显著。整体而言，流域蒸发皿蒸发量表现出增加趋势。

3.3　蒸发皿蒸发驱动因素

3.3.1　敏感性分析　通过平均气温、太阳净辐射、风速及实际水汽压 4 个主要气象变量因子来分析蒸发皿蒸发量的驱动因素。近 38 a 4 个气象因子的变化趋势(图略)得出：平均气温变化率为 0.41 ℃ · (10a)$^{-1}$，其中春季变化率最大 0.57 ℃ · (10a)$^{-1}$，冬季变化率最小 0.29 ℃ · (10a)$^{-1}$；太阳净辐射变化率为 0.62 MJ · m^{-2} · (10a)$^{-1}$，其中春夏季为增加趋势，变化率分别为 0.35 MJ · m^{-2} · (10a)$^{-1}$、0.07 MJ · m^{-2} · (10a)$^{-1}$，秋冬两季为减少趋势，变化率分别为 −0.13 MJ · m^{-2} · (10a)$^{-1}$、−0.1 MJ · m^{-2} · (10a)$^{-1}$；风速和实际水汽压变化趋势相对较弱，变化率依次为 −0.007 m · s^{-1} · (10a)$^{-1}$、0.017 kPa · (10a)$^{-1}$。

由表 1 可知，平均气温、太阳净辐射和风速与蒸发皿蒸发量表现出正敏感性，而实际水汽压则表现出负敏感性，即随着平均气温、太阳净辐射和风速的增加以及实际水汽压的减少，蒸发量随之增加。平均气温因子在秋冬两季的敏感性大于春夏两季，太阳净辐射因子则表现为夏秋两季敏感性更高，实际水汽压和风速均在春冬两季表现出较高的敏感性。流域蒸发皿蒸发量对实际水汽压因子表现最敏感(−1.136)，其次是太阳净辐射(0.97)和平均气温(0.587)，最后是风速(0.345)。若平均气温、太阳净辐射和风速各增大 10%，蒸发皿蒸发量将分别增

表 1　渭河流域各气候因子敏感系数

Tab. 1　Sensitivity coefficients of climatic factors in the Weihe River Basin

季节	$S(T_{mean})$	$S(R_n)$	$S(e_a)$	$S(U_2)$
春	−0.177	0.393	−1.421	0.612
夏	0.614	1.049	−0.850	0.291
秋	1.105	1.490	−0.854	0.173
冬	0.804	0.949	−1.419	0.304
年	0.587	0.970	−1.136	0.345

注：$S(T_{mean})$、$S(R_n)$、$S(e_a)$ 和 $S(U_2)$ 分别表示平均气温，太阳净辐射，实际水汽压和风速的敏感系数。

加 5.87%、9.7% 和 3.45%;实际水汽压增大 10%,蒸发皿蒸发量将减少 11.36%。

3.3.2 贡献分析 由公式(3)得出各气候因子对蒸发皿蒸发量长期变化趋势的贡献。由表 2 可知,除实际水汽压因子对蒸发皿蒸发量长期变化趋势表现出较大的负向贡献外,平均气温、太阳净辐射和风速 3 个因子均表现出正向贡献,即随着实际水汽压的增加蒸发皿蒸发量随之减少,然而实际水汽压产生的负向贡献被平均气温、太阳净辐射和风速的正向贡献所抵消。

在季节尺度上,平均气温、太阳净辐射、实际水汽压和风速上半年的贡献(0.868)大于下半年的贡献(-0.303),表明蒸发量的增加趋势主要受春夏两季气候变化影响。在上半年中,平均气温、太阳净辐射和夏季风速的正向贡献(1.209)大于实际水汽压和春季风速的负向贡献(-0.341),即蒸发量随平均气温和太阳净辐射的增加而增加;在下半年中,平均气温的积极贡献被太阳净辐射、实际水汽压和风速的负向贡献所抵消,即下半年蒸发量呈减少趋势是由太阳净辐射、风速的减少和实际水汽压的增加引起的。

在年尺度上,随着平均气温、太阳净辐射和风速的增加,蒸发皿蒸发量分别增加 1.118 mm·a^{-1}、0.16 mm·a^{-1}和 0.006 mm·a^{-1},而随着实际水汽压的增加,蒸发皿蒸发量减少速率为 0.925 mm·a^{-1};平均气温、太阳净辐射、实际水汽压和风速的年际贡献率分别为 304.50%、43.61%、-249.73% 和 1.62%,故流域蒸发皿蒸发量的变化受平均气温因子的影响最大,其次为实际水汽压。虽然蒸发皿蒸发对实际水汽压表现最为敏感,但贡献却小于平均气温,其原因是各因子贡献由偏导数与长期趋势的乘积得出,平均气温的长期变化趋势(0.041 ℃·a^{-1})远大于实际水汽压的长期变化趋势(0.001 7 kPa·a^{-1}),故平均气温是影响渭河流域蒸发皿蒸发量的最主要因素;风速因子对蒸发量趋势的贡献率最低,其原因是风速多年平均变化趋势最弱(-0.000 7 m·s^{-1})。

综上可得,平均气温是影响渭河流域蒸发皿蒸发量变化的最主要因素,因此,在全球变暖背景下,随着平均气温的增加,蒸发皿蒸发量随之增加,在该流域并未发现“蒸发悖论”现象;而实际水汽压表现出较高的负向贡献率,即随着水汽压的增加,蒸发皿蒸发量将随之减少,但实际水汽压的负向贡献被平均气温、太阳净辐射和风速的正向贡献所抵消,在各因子的综合影响下流域蒸发皿蒸发量呈增长趋势。

表 2 渭河流域各气候因子贡献及贡献率

Tab. 2 Contributions and contribution rates of climatic factors in the Weihe River Basin

季节	$C(T_{mean})$	$C(R_n)$	$C(e_a)$	$C(U_2)$	$C(PE)$
春	0.440	0.262	-0.129	-0.053	0.519
夏	0.358	0.097	-0.159	0.052	0.348
秋	0.222	-0.095	-0.331	-0.004	-0.207
冬	0.132	-0.018	-0.202	-0.007	-0.095
年	1.118	0.160	-0.917	0.006	0.367
	$p(T_{mean})$ /%	$p(R_n)$ /%	$p(e_a)$ /%	$p(U_2)$ /%	p_{sum} /%
春	84.69	50.45	-24.87	-10.28	100.00
夏	102.74	27.79	-45.57	15.03	100.00
秋	-107.09	45.99	159.36	1.73	100.00
冬	-138.97	19.12	212.30	7.55	100.00
年	304.50	43.61	-249.73	1.62	100.00

注:PE 表示蒸发皿蒸发量;$C(T_{mean})$,$C(R_n)$,$C(e_a)$ 和 $C(U_2)$ 分别表示平均气温、太阳净辐射、实际水汽压和风速各自变化对 PE 的长期趋势的贡献;$p(T_{mean})$,$p(R_n)$,$p(e_a)$ 和 $p(U_2)$ 分别表示平均气温、太阳净辐射、实际水汽压和风速对 PE 长期趋势的贡献率;p_{sum} 表示平均气温、太阳净辐射、实际水汽压和风速对 PE 长期趋势的总贡献率。

4 结 论

通过计算敏感系数及各因子贡献率,分析影响蒸发皿蒸发量的主要因素,对于渭河流域蒸发皿蒸发量时空变化与驱动因素得出如下结论:

(1) 渭河流域蒸发皿蒸发量多年平均值在 1 015.5~1 705.6 mm,南北差异比较明显。蒸发皿蒸发能力夏季>春季>秋季>冬季,分别占年蒸发皿蒸发量的 38.4%、31.7%、19.7% 和 10.2%;其多年蒸发皿蒸发量均值低于黄河流域的平均水平。

(2) 全流域范围内多年平均蒸发皿蒸发量呈增加趋势,变化率为 1.371 mm·a^{-1}。蒸发皿蒸发量呈显著增长的站点多分布在渭河流域西南部。

(3) 蒸发皿蒸发对实际水汽压最为敏感,敏感系数为 -1.136;影响蒸发皿蒸发变化的最主要因素为平均气温,贡献率为 304.50%,其次为实际水汽压,贡献率为 -249.73%,风速因子的贡献最小。

(4) 在全球变暖背景下,渭河流域蒸发皿蒸发量随平均气温的增加呈增加趋势,若气温升高 10%,蒸发皿蒸发量将随之增加 5.87%。

参考文献(References):

〔1〕 Held I M,Soden B J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming〔J〕. Journal of Climate,2006,19(21):5 686 – 5 699.

〔2〕 韩鹏飞,王旭升,胡晓农,等. 巴丹吉林沙漠湖泊水面蒸发与气象要素的动态关系〔J〕. 干旱区研究,2018,35(5):1 012 – 1 020.〔Han Pengfei,Wang Xusheng,Hu Xiaonong,et al. Dynamic relationship between lake surface evaporation and meteorological factors in the Badain Jaran Desert〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(5):1 012 – 1 020.〕

〔3〕 杨莲梅,关学锋,张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(2):1 012 – 1 020.〔Yang Lianmei, Guan Xuefeng, Zhang Yingxin. Atomspheric cirvulation characteristics of precipitation anomalu in arid regions in central Asia〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):1 012 – 1 020.〕

〔4〕 Roderick M L,Rotstayn L D,Farquhar G D,et al. On the attribution of changing pan evaporation〔J〕. Geophysical Research Letters,2007,34(34):251 – 270.

〔5〕 Zhang Q,Qi T,Li J,et al. Spatiotemporal variations of pan evaporation in China during 1960 – 2005:Changing patterns and causes〔J〕. International Journal of Climatology,2015,35(6):903 – 912.

〔6〕 刘敏,沈彦俊,曾燕,等. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因〔J〕. 地理学报,2009,64(3):259 – 269.〔Liu Min,Shen Yanjun,Zeng Yan,et al. Changing trend of pan evaporation and its cause over the past 50 years in China〔J〕. Acta Geographica Sinica,2009,64(3):259 – 269.〕

〔7〕 Ning T,Li Z,Liu W,et al. Evolution of potential evapotranspiration in the Northern Loess Plateau of China:Recent trends and climatic drivers〔J〕. International Journal of Climatology,2016,36(12):4 019 – 4 028.

〔8〕 Wang T,Zhang J,Sun F,et al. Pan evaporation paradox and evaporative demand from the past to the future over China:A review〔J〕. Wiley Interdisciplinary Reviews Water,2017,4(3):e1207.

〔9〕 左洪超,鲍艳,张存杰,等. 蒸发皿蒸发量的物理意义、近 40 年变化趋势的分析和数值试验研究〔J〕. 地球物理学报,2006,49(3):680 – 688.〔Zuo Hongchao,Bao Yan,Zhang Cunjie,et al. An analytic and numerical study on the physical meaning of pan evaporation and its trend in recent 40 years Chinese〔J〕. Chinese Journal of Geographysics,2006,49(3):680 – 688.〕

〔10〕 刘燕,胡安焱. 渭河流域近 50 年降水特征变化及其对水资源的影响〔J〕. 干旱区资源与环境,2006,20(1):87 – 89.〔Liu Yan,Hu Anyan. Changes of precipitation characters along Wei River basin in 50 years and its influence on water resources〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2006,20(1):87 – 89.〕

〔11〕 左德鹏,徐宗学,程磊,等. 渭河流域潜在蒸散量时空变化及其突变特征〔J〕. 资源科学,2011,33(5):975 – 982.〔Zuo Depeng,Xu Zongxue,Cheng Lei,et al. Spatial-temporal variations and mutations of potential evapotranspiration in the Wei River basin〔J〕. Resources Science,2011,33(5):975 – 982.〕

〔12〕 周杜辉. 渭河流域经济空间分异及其优化对策研究〔D〕. 西安:西北大学,2011.〔Zhou Duhui. Spatial Dissimilarity of Economies and Optimizing Strategies in the Wei River Valley〔D〕. Xi'an:Northwest University,2011.〕

〔13〕 班富孝. E – 601 型蒸发器与 20 cm 口径蒸发皿折算系数〔J〕. 南水北调与水利科技,1999(1):46 – 48.〔Ban Fuxiao. E – 601 type and 20 cm pan evaporation conversion coefficient〔J〕. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,1999(1):46 – 48.〕

〔14〕 邓晓斌. 基于 ArcGIS 两种空间插值方法的比较〔J〕. 地理空间信息,2008,6(6):85 – 87.〔Deng Xiaobin. Comparison between two space interpolation methods based on ArcGIS〔J〕. Geospatial Information,2008,6(6):85 – 87.〕

〔15〕 魏继德. 空间插值方法的比较与优化〔D〕. 福建:福州大学,2010.〔Wei Jide. The Comparison and Optimization of Spatial Interpolation Approaches〔D〕. Fujian:Fuzhou University,2010.〕

〔16〕 Mann H B. Nonparametric test against trend〔J〕. Econometrica,1945,13(3):245 – 259.

〔17〕 Kendall M G. Rank correlation methods〔J〕. British Journal of Psychology,1955,25(1):86 – 91.

〔18〕 赵广举,穆兴民,田鹏,等. 近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析〔J〕. 资源科学,2012,34(6):1 070 – 1 078.〔Zhao Guangju,Mu Xingmin,Tian Peng,et al. The variation trend of streamflow and sediment flux in the middle reaches of Yellow River over the past 60 years and the influencing factors〔J〕. Resources Science,2012,34(6):1 070 – 1 078.〕

〔19〕 Yue S,Pilon P,Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series〔J〕. Journal of Hydrology,2002,259(1):254 – 271.

〔20〕 韩盟伟,赵广举,穆兴民,等. 黄土高原 1959—2015 年潜在蒸发量的时空变化〔J〕. 干旱区地理,2017(5):997 – 1 004.〔Han Mengwei,Zhao Guangju,Mu Xingmin,et al. Spatial and temporal variations of potential evapotranspiration on the Loess Plateau during 1959 – 2015〔J〕. Arid Land Geography,2017(5):997 – 1 004.〕

〔21〕 Xu L,Shi Z,Wang Y,et al. Spatiotemporal variation and driving forces of reference evapotranspiration in Jing River Basin,Northwest China〔J〕. Hydrological Processes,2015,29(23):4 846 – 4 862.

〔22〕 Mccuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation〔J〕. Journal of the American Water Resources Association,1974,10(3):486 – 497.

〔23〕 Zheng H,Liu X,Liu C,et al. Assessing contributions to panevaporation trends in Haihe River Basin,China〔J〕. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2009,114(D24):1 – 12.

〔24〕 邱新法,刘昌明,曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征〔J〕. 自然资源学报,2003,18(4):437 – 442.〔Qiu Xinfa,Liu Changming,Zeng Yan. Changes of pan evaporation in

the recent 40 years over the Yellow River Basin〔J〕. Journal of Natural Resources,2003,18(4):437 - 442.〕

〔25〕柳春,王守荣,梁有叶,等. 1961—2010 年黄河流域蒸发皿蒸发量变化及影响因子分析〔J〕. 气候变化研究进展,2013,9(5):327 - 334.〔Liu Chun,Wang Shourong,Liang Youye,et al. Analysis of pan evaporation change and the influence factors in the Yellow River Basin in 1961 - 2010〔J〕. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis,2013,9(5):327 - 334.〕

Spatiotemporal Variation and Driving Factors of Pan Evaporation in the Weihe River Basin

ZHANG Peng-fei[1], ZHAO Guang-ju[1,2], MU Xing-min[1,2], GAO Peng[1,2], SUN Wen-yi[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Framing on the Loess Plateau*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *Shaanxi*, *China*;
2. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources*, *Yangling* 712100, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: It is better to quantitative assess the spatiotemporal variation and driving factors of pan evaporation for understanding the hydrological cycle and water resources management. In this study, it was attempted to use the data of daily pan evaporation observed with 20 cm pan from 1978 to 2002 and E - 601 evaporator from 1985 to 2015 at 21 meteorological stations in the Weihe River Basin. A linear regression model was used to reconstruct the evaporation data at the observation sites. Spatiotemporal change of pan evaporation was analyzed using the Mann-Kendall test. Sensitivity analysis was employed to evaluate the contribution of meteorological factors to pan evaporation. The results showed that the multi-year average evaporation capacity of the evaporating dish in the study area was lower than that in the Yellow River Basin and the pan evaporation values were 1 015.5 - 1 705.6 mm. the mean annual pan evaporation decreased from the north to the south. The annual mean evaporation increased generally with an increase rate of 1.371 mm · a^{-1} in the whole watershed. The pan evaporation was the most sensitive to the actual vapor pressure. Temperature was the dominant factor affecting pan evaporation, and its contribution rate was approximately 304.5%.

Key words: pan evaporation; spatiotemporal variation; sensitivity analysis; driving factor; Weihe River Basin